

## ОСЦИЛЛОГРАФИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПОТЕНЦИАЛОВ ПО РОТОРУ В ЭСГ

А. М. КУПЦОВ, В. В. ПАЦЕВИЧ.

(Представлена научным семинаром кафедры ТОЭ и отделом РЭСГ НИИ ЯФ)

Одним из основных условий по реализации в электростатических генераторах (ЭСГ) максимальной полезной мощности является создание равномерного электрического поля в рабочем объеме. О характере поля в общем случае можно судить по распределению потенциалов по ротору. Наиболее благоприятным с этой точки зрения, естественно, является равномерное распределение.

Для выравнивания потенциалов по ротору в промышленных ЭСГ создают линейное распределение потенциалов по статору [1], применяя слабопроводящие покрытия, что впервые было предложено еще в 30-х годах академиком А. Ф. Иоффе. Наиболее часто для этих целей используется стекло.

Следует отметить, что рассмотрению вопроса о распределении потенциалов по ротору, позволяющему получить довольно обширную информацию о характере электрического поля в рабочем объеме, не уделялось должного внимания. Изложенные в [3] результаты расчета распределения потенциалов по ротору через частичные емкости на основе метода электростатической аналогии выполнены с рядом допущений и в работе не анализируются.

Цель данной работы — на основе экспериментальных результатов, полученных на опытной модели ЭСГ, исследовать характер распределения потенциалов по ротору и установить связь этого распределения с другими физическими процессами.

### Методика исследования

Методика исследования, впервые описанная в [4], основывалась на измерении потенциала одного из транспортеров ротора при работе генератора посредством специально выполненного емкостного делителя. Вращаясь, транспортер за полный оборот ротора последовательно занимает положение всех транспортеров, изменяя свой потенциал от величины, соответствующей напряжению щетки возбуждения до напряжения нагрузки и обратно. Таким образом, закон изменения потенциала любого из транспортеров за один оборот ротора дает полную картину распределения потенциалов транспортеров при работе генератора в любом режиме. Для фиксирования закона распределения потенциалов по ротору использовался электронный осциллограф 2КО/721, вертикально отклоняющие пластины которого совместно с паразитными емкостями шунтирующего сопротивления и подводящего провода составляли емкость низковольтного плеча делителя.

Высоковольтным плечом делителя служил специальный воздушный конденсатор, вращающаяся обкладка которого располагалась непосредственно на изоляционном валу ротора таким образом, чтобы емкость конденсатора, вторая неподвижная обкладка которого укреплялась на статоре, при вращении ротора оставалась постоянной.

Транспортер соединялся с вращающейся обкладкой конденсатора проводником, проложенным в диэлектрике ротора. Для изменения коэффициента деления емкостного делителя емкость воздушного конденсатора могла изменяться путем изменения расстояния между обкладками. Калибровка делителя осуществлялась при помощи напряжения постороннего высоковольтного источника с частотой напряжения 50 гц, близкой к частоте измеряемого сигнала. Одновременно констатировалось, что измерительная схема существенных искажений калибровочного сигнала не дает.

Исследования проводились на действующей модели ЭСГ в атмосфере воздуха. Ротор генератора представлял из себя диск на основе компаунда из эпоксидной смолы холодного отверждения с транспортерами-проводниками U-образной формы. Внешний диаметр ротора 494 мм. Число транспортеров 474. Скорость вращения ротора 1000 об/мин.

### **Распределение потенциалов транспортеров при металлическом статоре**

Эксперименты с проводящим статором проводились в первую очередь с целью отработки методики на действующей модели генератора, так как в этом случае закон распределения потенциалов транспортеров можно рассчитать, например, по методике, изложенной в [3], а также получить по результатам качественного рассмотрения картины поля в рабочем объеме. Кроме того, эти эксперименты представляют самостоятельный интерес при исследовании явления естественной перезарядки, результаты которого рассматриваются отдельно.

Отработка методики производилась при низких напряжениях возбуждения, при которых заметная утечка зарядов с транспортеров при измерении токов отсутствовала.

Осциллограмма распределения потенциалов транспортеров для кондукционной схемы возбуждения при щетках, касающихся только одного транспортера (узкие щетки), при этом имеет вид, представленный на рис. 1, а.

Здесь транспортер в момент соединения со щеткой возбуждения имеет потенциал, равный по величине напряжению возбуждения. При отсоединении от щетки возбуждения его потенциал резко возрастает, оставаясь практически постоянным в промежутке между индукторами. При подходе к разрядной щетке потенциал транспортера снижается, принимая значение равное нулю при соединении со щеткой. После отсоединения от зарядной щетки потенциал транспортера становится отрицательным.

Если при работе генератора используются щетки, перекрывающие не менее пяти транспортеров (широкие щетки), потенциал транспортера, перемещающегося к разрядной системе, практически не превышает величины  $U_b$ , а при обратном перемещении (к системе возбуждения) его потенциал примерно равен нулю.

Сравнение экспериментальной кривой распределения потенциалов с законом распределения, полученным расчетным путем согласно соотношениям, выведенным в [3], дает достаточно хорошее совпадение.

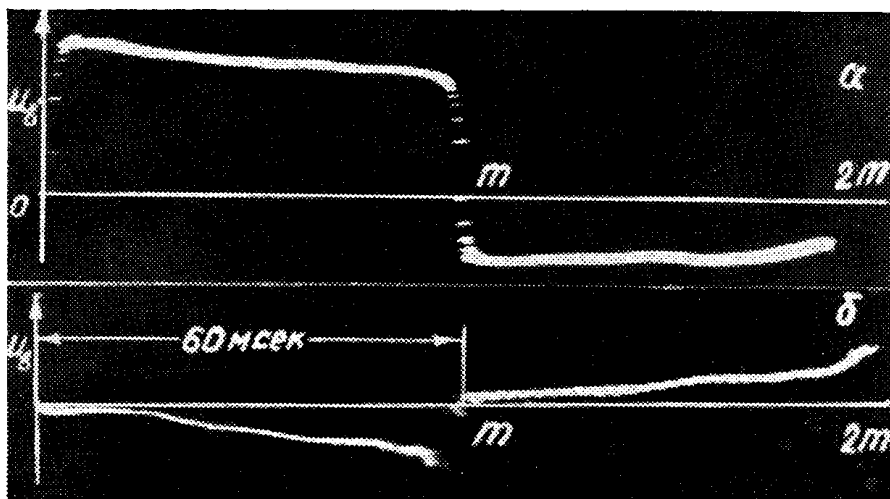


Рис. 1. Осциллограммы распределения потенциалов при  $U_b < U_k$

### Распределение потенциалов транспортеров при принудительном задании потенциалов по статору

Статор с принудительным распределением потенциалов может быть выполнен двух видов: в виде металлических пластин — секторов, соединенных с активным делителем, и в виде слабопроводящих поверхностей. В первом случае при тщательном выполнении делителя наиболее просто получить контролируемое распределение потенциала по статору. Поэтому в первую очередь рассмотрено распределение потенциалов транспортеров со статором из металлических секторов, соединенных с активным делителем, и затем со статором из стекла. Причем, если обозначить величину напряжения возбуждения, соответствующую точке загиба характеристик  $I_{кз} = f(U_b)$  через  $2U_k$ , то осциллограммы распределения потенциалов при  $U_b < U_k$  и  $U_b > U_k$  имеют несколько различный характер.

а) Напряжение возбуждения меньше критического.

Осциллограммы распределения потенциалов по виду практически не отличаются от осциллограмм с проводящим статором при работе генератора с широкими щетками при одинаковых условиях с кондукционной схемой возбуждения. Если схему возбуждения изменить на индукционную, то потенциал транспортера, соединенного со щеткой возбуждения, равен 0 и при дальнейшем перемещении к разрядной системе линейно возрастает до  $U_b$ . При соединении с разрядной щеткой потенциал транспортера падает до 0, а при перемещении к системе возбуждения линейно изменяется аналогично изменению потенциалов статора.

При работе генератора со статором из стекла в установившемся режиме (7–10 минут после изменения режима работы или  $U_b$ ) с кондукционной схемой возбуждения закон распределения потенциалов транспортеров становится таким же, как и при работе с проводящим или секторным статорами. Осциллограммы с индукционной схемой возбуждения аналогичны по виду представленным на рис. 1, б. Следует отметить, что в кривой распределения потенциалов для секторного и слабопроводящего статоров имеются незначительные пульсации, число которых равно общему числу транспортеров. Для секторного статора пульсации несколько больше из-за дискретной структуры самого статора и пропорциональны числу элементов статора.

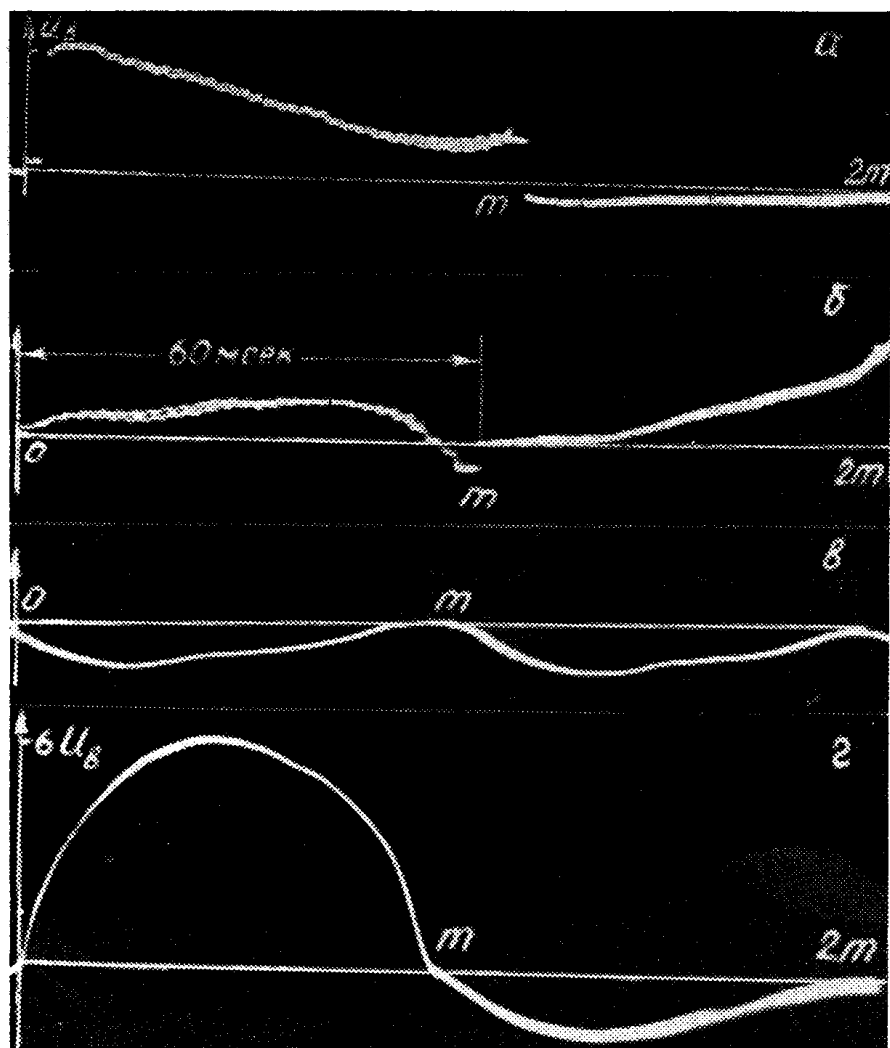


Рис. 2. Осциллограммы распределения потенциалов при  $U_b > U_k$

б) Напряжение возбуждения больше критического. Осциллограмма распределения потенциалов при секторном статоре (кондукционная схема возбуждения) с широкими щетками представлена на рис. 2, а. В отличие от осциллограмм при  $U_b < U_k$  здесь после выхода транспортера из системы возбуждения потенциал транспортера несколько снижается, возрастая вновь при подходе к разрядной системе. Однако при подходе транспортера к разрядной щетке его потенциал ниже  $U_b$ .

Осциллограмма распределения с индукционной схемой возбуждения представлена на рис. 2, б. Если теперь закоротить источник возбуждения, то потенциалы транспортеров не принимают нулевого значения, как это было при низких  $U_b$ . Осциллограмма распределения потенциалов в этом случае подобна представленной на рис. 2, в. Полярность потенциалов транспортеров при закороченном  $U_b$  всегда противоположна по знаку потенциалам транспортеров в предыдущем рабочем режиме.

При замене секторного статора стеклом закон распределения потенциалов по ротору несколько сложнее, но основные закономерности изменения в установившемся режиме аналогичны описанным для секторного статора.

## Распределение потенциалов по ротору при диэлектрическом статоре

Было рассмотрено распределение потенциалов транспортеров в генераторе со статорм, выполненным из оргстекла, а также при работе генератора с одними индукторами. Закон распределения потенциалов со статорм из оргстекла носит случайный характер, изменяющийся при касании статора заземленными предметами, а также с течением времени и преимущественно резко неравномерный.

Неравномерность распределения потенциалов тем больше, чем больше приложенное напряжение возбуждения. Это характерно как для кондукционной, так и для индукционной схем возбуждения. При работе генератора с одними индукторами осциллограмма распределения потенциалов транспортеров (широкие щетки, кондукционная схема возбуждения) представлена на рис. 2, г при напряжении возбуждения несколько большем  $U_k$ .

Потенциал транспортера, соединенного со щеткой возбуждения равен потенциалу этой щетки. При перемещении к разрядной системе его потенциал резко возрастает, значительно превосходя  $U_v$ , и имеет максимум в промежутке между индукторами. В разрядной системе транспортер непосредственно перед коммутацией имеет потенциал, близкий к величине  $U_v$ .

При перемещении к системе возбуждения, потенциал транспортеров при  $U_v < U_k$  равны нулю, а при  $U_v > U_k$  отличны от нуля и тем больше (по абсолютному значению), чем больше  $U_v$ .

### Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные данные по распределению потенциалов транспортеров по ротору при  $U_v < U_k$  достаточно хорошо согласуются с качественным рассмотрением характера распределения потенциалов на основе метода электростатической аналогии.

Рассмотрение характера распределения потенциалов транспортеров при  $U_v < U_k$  и  $U_v > U_k$  показывает, что эти режимы должны иметь существенное различие в физических процессах, сопровождающих работу генератора, несмотря на то, что до  $U \leq 2U_k$  сохраняется линейность характеристики короткого замыкания. При ориентировочной оценке величина среднего значения нормальной составляющей напряженности электрического поля в зазоре ротор-статор (при металлическом, секторном и слабопроводящем статорах) для  $U_v \approx U_k$  получается  $E_{н. ср.} = 18 \div 20$  кв/см.

Учитывая, что максимальное значение напряженности электрического поля в зазоре будет больше среднего, естественно предположить, что при  $U_v \gtrsim U_k$  в зазоре возникают критические градиенты, вызывающие повышенную ионизацию газа.

Наличие достаточно большого количества ионов в зазоре приводит к тому, что последние под действием электрического поля будут осаждаться на поверхности диэлектрика ротора и на статоре. При этом на ток от источника возбуждения по делителю статора будет накладываться ток от осаждаемых ионов. О величине и направлении тока от осаждаемых ионов можно судить по закону распределения потенциалов секторов статора при кондукционной системе возбуждения, когда заземлены как высоковольтный индуктор, так и индуктор возбуждения.

При напряжении возбуждения 6 кв (широкие щетки) потенциал секторов, расположенных посредине между индукторами, равен 2,5 кв для восходящей ветви и 1,2 кв для сходящей. При работе без статора

с одними индукторами критические градиенты появляются при более низких напряжениях возбуждения из-за сильной неравномерности электрического поля в зоне выхода транспортеров из области индукторов (рис. 2, г). Подтверждением наличия зарядов на диэлектрической поверхности ротора при  $U_B > U_K$  является возникновение потенциала на транспортерах при обратном ходе, а также наличие потенциала на транспортерах при закороченном источнике возбуждения, если перед установлением закоротки  $U_B > U_K$ .

Качественное совпадение осциллограмм распределения потенциалов транспортеров при секторном статоре и со стеклом в установившемся режиме говорит о том, что и здесь имеет место ионизация газа в зазоре. Нелинейность распределения потенциала вызвана нелинейным распределением потенциала по статору за счет тока, вызванного ионами осаждения на стекле. Существенным фактом, подтверждающим наличие заряда на поверхности диэлектрика ротора, является также то, что при напряжении возбуждения  $U_B \gtrsim 2U_K$  в зазоре ротор-статор в области как высоковольтного индуктора, так и индуктора возбуждения при затемнениях видна интенсивная корона, распространяющаяся на весь зазор по мере дальнейшего увеличения напряжения возбуждения.

### Распределение потенциала и естественная перезарядка

Согласно данному в [5] объяснению явления естественной перезарядки это явление имеет место при узких щетках и заключается в некотором увеличении тока генератора за счет влияния соседних заряженных транспортеров. Явление естественной перезарядки должно отсутствовать при широких щетках, перекрывающих одновременно несколько транспортеров. При металлическом статоре замена широких щеток на узкие приводит при прочих равных условиях к увеличению потенциалов транспортеров при их прямом ходе и к появлению потенциала обратного знака на транспортерах при их обратном ходе (рис. 1, а).

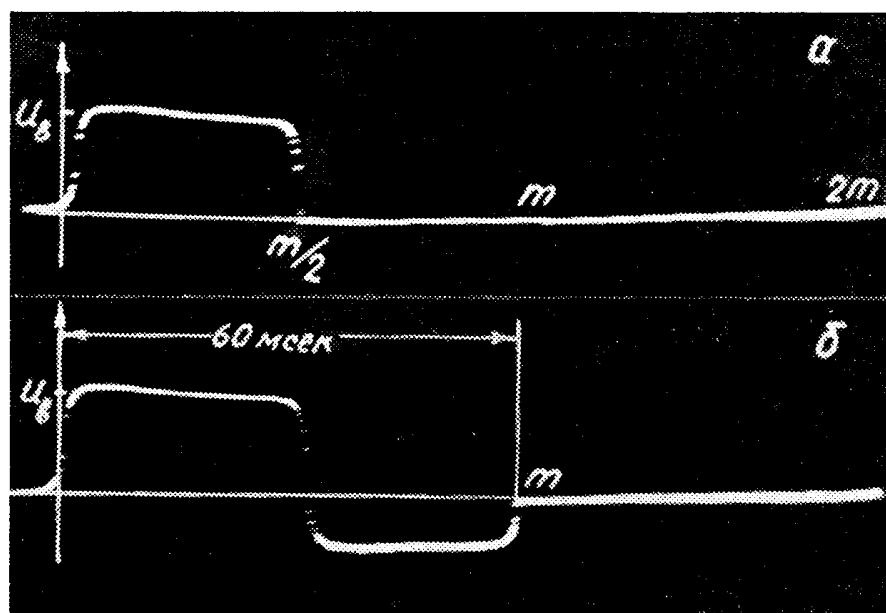


Рис. 3. Осциллограммы распределения потенциалов при отсутствии (а) и наличии (б) естественной перезарядки.

На рис. 3, а представлены осциллограммы распределения потенциалов транспортеров при металлическом статоре, когда за зарядной щеткой устанавливались две разрядные широкие щетки при  $U_b < U_k$ . Если при прочих равных условиях заменить первую разрядную щетку на узкую, то осциллограмма примет вид, представленный на рис. 3, б. Здесь потенциал транспортера после отсоединения его от первой разрядной щетки изменяет свой знак на обратный по сравнению с тем, который был у него до соединения со щеткой. Изменение знака потенциала транспортеров является наглядным доказательством явления естественной перезарядки. Можно отметить, что замена широких щеток на узкие во всех других экспериментах дает такой же эффект, то есть увеличивается абсолютное значение потенциала транспортеров при их прямом и обратном ходе. При этом для случаев  $U_b > U_k$  максимум тока достигается при меньших значениях  $U_b$  и примерно равен максимальному значению тока при широких щетках для проводящего, секторного и слабопроводящего статоров. Таким образом, появление критических напряженностей электрического поля в первую очередь обуславливается величиной заряда транспортера.

### Выводы

На основе полученного материала можно сказать о распределении потенциалов по ротору следующее:

1. Во всех случаях максимальные градиенты потенциала находятся в зонах коммутации.
2. Для диэлектрических статоров и при работе генератора с одними индукторами характерно наличие повышенных разностей потенциалов как между транспортерами, так и относительно заземленных элементов, что подтверждает их бесперспективность.
3. Изменение закона распределения потенциалов транспортеров при повышенных  $U_b$  вызвано ионизационными явлениями в зазоре ротор-статор.
4. Ионизация в зазоре наступает при меньших  $U_b$ , если проявляется эффект естественной перезарядки, что всегда имеет место при работе генератора с узкими щетками.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Ж. Фелиси. Электростатический генератор с вращающимся цилиндром и водородной изоляцией. Электричество, № 1, 1962.
2. А. Ф. Иоффе. Электростатический генератор, ЖТФ, т. IX, 1939.
3. В. Д. Эськов. К вопросу о распределении потенциалов по ротору в ЭСГ. Изв. ТПИ, т. 152, 1966.
4. А. М. Кушцов. К вопросу исследования коммутации стержневых ЭСГ. Тезисы докладов на VI Межвузовской конференции по ускорителям, ТГУ, г. Томск, 1966.
5. В. В. Пацевич. Некоторые вопросы теории и расчета ЭСГ с транспортерами-проводниками. Диссертация, Томск, 1964.